

# 光学マウスのセンサを用いた運動計測装置

## ～平面移動および高さ変化の計測～

○永井伊作(岡山大学) 渡辺桂吾(岡山大学) 永谷圭司(東北大学) 吉田和哉(東北大学)

### 1. はじめに

惑星探査ローバーやレスキューロボットでは不整地を走行するため車輪が滑ったり沈んだりする。そのようなロボットの移動量推定では車輪情報に基づくオドメトリの信頼性が低いため、より精度の高い計測手段のあることが望まれる。移動ロボットではジャイロセンサや加速度センサにより運動量を推定する従来手法が存在するが、それらの慣性センサではドリフト特性が要因で比較的低速な移動の計測では不要な蓄積誤差が生じる問題がある。

我々は惑星探査ローバーの運動量推定のために、光学マウスのセンサを用いた装置を製作し、2次元の運動を計測した結果および砂の斜面を登るローバーの移動量をオドメトリよりも精度よく推定できることを報告した[1]。光学マウスのセンサをそのまま用いる場合、計測精度を維持するためにはセンサモジュールを移動面へ密着させて使用する必要があるが[2][3]、我々の方法では走行面からセンサを離れた状態で使うことができ、かつ、高さが変動する場合でも精度を保って移動量を推定できる。

本研究では我々がこれまでに開発した装置を発展させ、姿勢や高さの変化を検出できるよう計測の自由度を高める。以下では計測原理、装置の概要、装置をロボットアームに取り付けて評価した結果を述べる。

### 2. 計測原理

#### 2.1 物体運動とスペックル移動

マウスでは移動量を光学的に検出するが、その計測原理には主に2方式がある。1つは赤色LED等の光を照射した物体表面で観察できる模様そのものを2次元素子で撮影しその移動を追跡する方法であり、こちら方式のマウスは一般に光学マウスと呼ばれている。もう1つは物体に赤外等のレーザー光を当てたときに観察できるスペックル(斑点)を2次元素子で撮影してその移動を追跡する方法であり、こちらの方式のマウスはレーザーマウスと呼ばれている。スペックルは細かな凹凸のある物体表面へレーザー光を照射したとき、反射光が互いに干渉し合って生じるランダムな明暗模様であり、光スポットが見える空間内では場所を問わず観察できる。このようなスペックルの生成とその移動に関しては山口の報告[4]が詳しい。ここではその中から本研究に関係する部分を説明する。山口の理論式において、物体に変形(ひずみ)がなく、かつ、平行なレーザー光

源を用いた場合、スペックルの移動量( $A_x, A_y$ )は図1に示す座標系において、レーザー光の照射領域の平行移動成分を( $a_x, a_y, a_z$ )、回転成分を( $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$ )とする、

$$A_x = a_x \cos \theta_0 - a_z \sin \theta_0 - L_0 \left[ -\Omega_y \left( \frac{\cos \theta_S}{\cos \theta_0} + 1 \right) \right] \quad (1)$$

$$A_y = a_y - L_0 [-\Omega_x (\cos \theta_S + \cos \theta_0) - \Omega_z (\sin \theta_S + \sin \theta_0)]$$

となる。ここで、 $L_0, \theta_0$ は観測面の方向と距離、 $\theta_S$ は入射するレーザー光の入射角である。

本研究では、平坦な砂地上を車輪が滑ったり沈んだりする状況で移動ロボットが走行することを想定して、光源とセンサを含む装置全体の方向は地面に対して垂直かつ傾きが発生しないと仮定する。この場合、 $\theta_S = 0, \Omega_x = 0, \Omega_y = 0$ であるため、

$$\begin{aligned} A_x &= a_x \cos \theta_0 - a_z \sin \theta_0 \\ A_y &= a_y + \Omega_z L_0 \sin \theta_0 \end{aligned} \quad (2)$$

となる。

#### 2.2 センサの配置と運動量の算出

本装置では4つのマウス用センサ(Avago ADNS-6010)を用いる。ただしセンサに元々付属する赤外線レーザー光源およびレンズは取り外し、代わりに1本の赤色レーザー光源を組み合わせる。これらのセンサ $O_1 \sim O_4$ および光源 $S$ の配置を図2に示す。各センサは基準点 $C$ を中心として対称的に位置し、各センサ面はレーザー光に垂直である。 $C$ から各センサおよびレーザースポット $G$ までの距離をそれぞれ $r, h$ とする。図2で示す向きにセンサの座標系( $X, Y, Z$ )、微小運動量( $a_x, a_y, a_z, \Omega_z$ )を定義する。

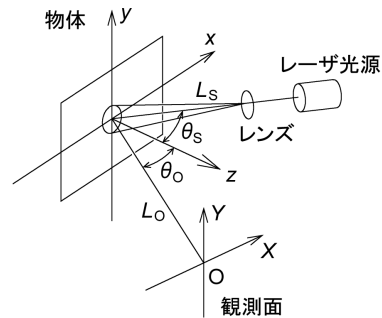


図1 物体運動によるスペックル移動を求める座標系

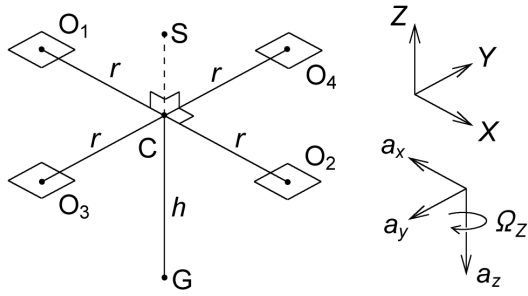


図2 光源 S およびセンサ  $O_1 \sim O_4$  の配置, レーザスポット G, センサの座標系  $(X, Y, Z)$ , 微小運動量  $(a_x, a_y, a_z, \Omega_z)$

式(2)の  $\cos \theta_0$  は, センサ面が  $Z$  軸に対して  $\theta_0$  だけ傾いているため計測値が少なくなることを意味するが, 本装置ではセンサ面は  $Z$  軸と垂直である. 我々が行った実験では,  $Z$  軸方向の移動および回転がない, すなわち  $a_z = 0, \Omega_z = 0$  のときにセンサの  $X$  軸方向と  $Y$  軸方向の計測値に差が見られなかったため, 式(2)では  $\cos \theta_0 = 1$  になると考えられる. これより, センサ  $O_1$  の計測値  $x_1, y_1$  は式(2)および  $\cos \theta_0 = 1$  を用いて,

$$\begin{aligned} x_1 &= a_x - a_z \sin \theta_0 \\ y_1 &= a_y + r \Omega_z \end{aligned} \quad (3)$$

ここで,  $r = L_0 \sin \theta_0$  である. 他のセンサ  $O_2 \sim O_4$  についても同様に,

$$\begin{aligned} x_2 &= a_x + a_z \sin \theta_0 \\ y_2 &= a_y - r \Omega_z \\ x_3 &= a_x + r \Omega_z \\ y_3 &= a_y - a_z \sin \theta_0 \\ x_4 &= a_x - r \Omega_z \\ y_4 &= a_y + a_z \sin \theta_0 \end{aligned} \quad (4)$$

ここで, 式(3)および式(4)を用いると,

$$\begin{aligned} a_x &= (x_1 + x_2 + x_3 + x_4)/4 \\ a_y &= (y_1 + y_2 + y_3 + y_4)/4 \\ a_z &= (x_2 - x_1 + y_4 - y_3)/4 \sin \theta_0 \\ \Omega_z &= (x_3 - x_4 + y_1 - y_2)/4r \end{aligned} \quad (5)$$

が得られる. これは各センサの計測値  $x_u, y_u (u=1 \sim 4)$  から微小運動量が求められることを表す. 最終的には式(6)で示すようにこれらの微小運動量を積算して現在の位置・姿勢  $(X_i, Y_i, Z_i, \theta_i)$  を求める. ここで  $i$  は時系列データの番号である. 理論的にはセンサは2つでもよいが, 姿勢の誤差を抑えるために本研究では4つ用いることとした.

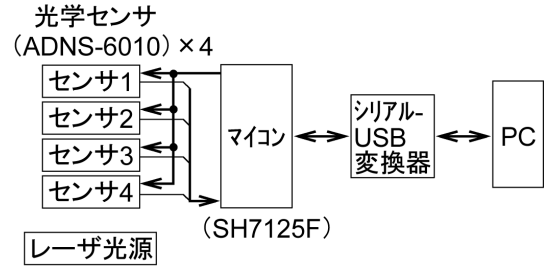


図3 装置の構成

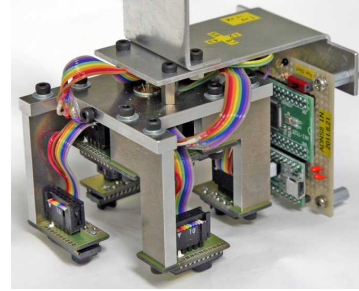


図4 センサ部の外観

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ \theta_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{i-1} \\ Y_{i-1} \\ Z_{i-1} \\ \theta_{i-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta_{i-1} & -\sin \theta_{i-1} & 0 & 0 \\ \sin \theta_{i-1} & \cos \theta_{i-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \\ \Omega_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

### 3. 装置の概要

本装置の構成を図3に示す. マイコンは4つのセンサに対して同じ読み出し命令を同時に送信し, 各センサから相対移動量を同時に受信する. そして, 相対移動量をそれぞれ累積して各センサの移動量を  $0.6 \text{ ms}$  毎に更新する. PCではマイコンより移動量を随時読み出し, 前回読み出した値との差を求めてセンサの計測値  $x_u, y_u (u=1 \sim 4)$  とする. なお, センサの分解能は  $0.0838 \text{ mm/カウント}$  である.

PCを除いた装置 (以下センサ部) の外観を図4に示す. センサ部の大きさは高さ  $72 \text{ mm}$ , 幅  $80 \text{ mm}$ , 奥行き  $112 \text{ mm}$  であり, 質量は  $0.25 \text{ kg}$  である. また,  $r = 32 \text{ mm}$ , 基準点 C から光源までの距離は  $30 \text{ mm}$  である. センサ部への電源 ( $5 \text{ V}, 0.3 \text{ A}$ ) は PC の USB ポートから供給されるため, センサ部と PC の接続はケーブル1本だけである.

### 4. 実験

#### 4.1 実験環境

次節以降で述べる実験では, センサ部をロボットアーム (RV-M2) の手首に取り付けて移動させ, アームに与えた移動量と比較して本装置の出力を評価した. このロボットアームは位置  $0.1 \text{ mm}$ , 角度  $0.1 \text{ deg}$

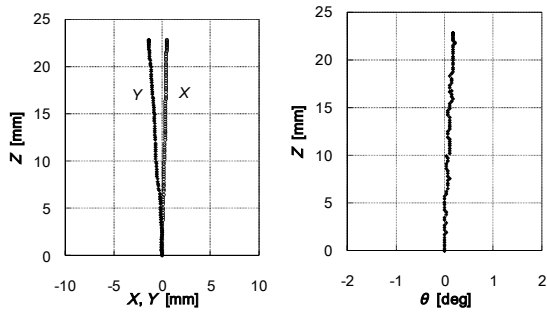
の繰り返し位置決め精度を持つ。移動速度は 50 mm/s、回転時の周速度は 38 mm/s とした。また、4.2 節を除いて移動開始時の高さは  $h = 90$  mm とした。スポット光が照射される面の材質は白色の紙とした。

#### 4.2 高さの違いが面内移動量に与える影響

高さ  $h$  を 65 mm, 90 mm, 115 mm の 3 通りに設定して、 $X$  軸方向に 100 mm 移動させた。いずれの場合も、終点で推定された  $X$  座標の移動量に対する誤差は 0.9% 以下であった。このように光源に平行光を用いると  $X$ - $Y$  の面内における移動量を高さの違いに影響されずに一定精度で計測できる。本装置では常にこの平行光の光源が用いられる。

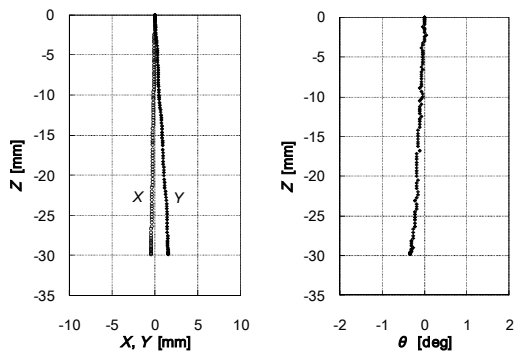
#### 4.3 高さのみ変化させた場合

高さ  $h$  のみを変化、すなわち  $Z$  軸方向へセンサ部を移動させた。図 5 は  $Z$  軸の正方向へ 25 mm、図 6 は  $Z$  軸の負方向へ 25 mm 移動させた場合の結果である。正方向では誤差 -8.9%、負方向では誤差 19% となった。 $Z$  以外の計測値はほとんど変化しておらず、本装置は高さ方向の移動量を計測できると言える。我々のローバーでは通常 30 mm 程度は車輪が沈むため、本装置を用いればそのような車体が沈む運動は十分捉えられると考えられる。初期条件のまま一定としている  $\theta_0$  を高さに応じた値に変化させることも試したが誤差はむしろ大きくなった。高さ変化の計測精度をさらに良くするには何か他の方法が必要と思われる。



(a)  $X, Y$ - $Z$  (b)  $\theta$ - $Z$

図 5  $Z$  軸正方向へ 25mm 移動させたとき



(a)  $X, Y$ - $Z$  (b)  $\theta$ - $Z$

図 6  $Z$  軸負方向へ 25mm 移動させたとき

#### 4.4 高さを変化させながら $X$ 軸方向へ移動

$X$  軸方向に 100 mm 移動させながら、 $Z$  軸方向への移動が同時に加わった直線運動の結果を図 7 に示す。 $Z_{(0)}$  は高さを変化させなかった場合、 $Z_{(25)}$  は高さを 25 mm 増加させた場合、 $Z_{(-25)}$  は高さを 25 mm 減少させた場合の結果である。前節の実験と同様に、 $Z$  軸の正方向では小さめに、負方向では多めに推定される結果となった。一方、 $X$  座標の誤差は最大でも 1.2% であり、4.2 節の結果や従来手法の装置[1]と比べても誤差はそれほど大きくない。 $X$  座標の計測は高さ変化の影響を受けないことが分かる。

上と同じ条件で、図 8(a) に示すような高さ 10 mm の突起 2 つを移動面上に設けて実験した結果を図 8(b) に示す。突起によって距離  $h$  が 10 mm 変動したにも関わらず、図 7 に示した平坦な場合とほぼ同じ結果であった。このことは、本装置がスポットまでの距離変化を検出して  $Z$  軸方向の運動を推定するのではなく、静止した移動面に対するセンサ部の純粋な運動を推定するものであることを示している。

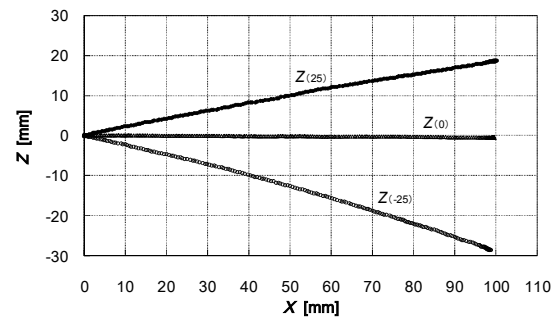
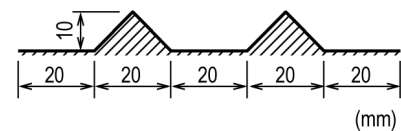
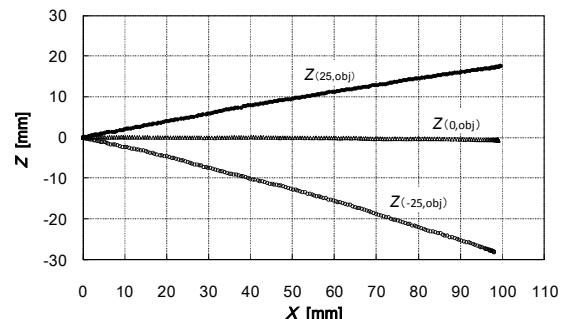


図 7 高さを直線的に変化させながら  $X$  軸方向に 100 mm 移動させたときの結果

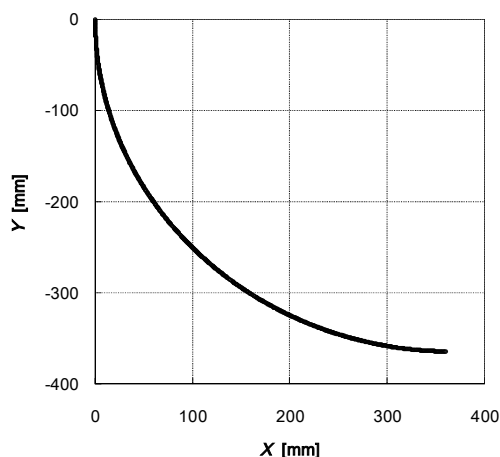


(a) 突起の大きさと位置

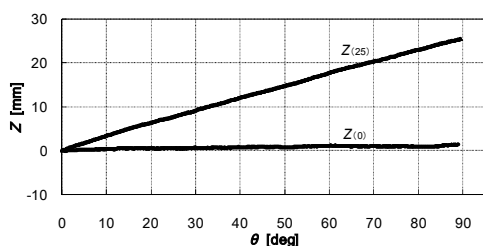


(b) 計測結果

図 8 突起が設けられた移動面で、高さを直線的に変化させながら  $X$  軸方向に 100 mm 移動させたときの結果



(a) X-Y



(b)  $\theta$ -Z

図9 半径 360 mm の円弧上を移動しながら 90 deg 回転させたときの結果

#### 4.5 円弧上を回転しながら移動させた場合

ロボットアームの第 1 関節を回転させてセンサ部を半径 360 mm の円弧上を回転しながら移動させたときの結果を図 9(a)に示す。図 9(b)の  $Z_{(0)}$  は高さを変化させなかった場合、 $Z_{(25)}$  は移動とともに高さを 25 mm 増加させた場合の結果を示す。高さ変化がない場合、終点での移動量 565 mm に対する位置誤差は 0.86 %、回転量 90 deg に対する角度誤差は 1.1 %であった。高さ変化を伴う場合、移動量 566 mm に対する終点の位置誤差は 1.1 %、角度誤差は 0.64 %であった。これらの結果より本装置は位置・姿勢( $X, Y, Z, \theta$ )が同時に変化する運動を計測でき、移動ロボットの運動計測に利用できると考えられる。

## 5. おわりに

惑星探査ローバーの移動量推定へ応用することを想定した、光学マウスのセンサを用いた運動計測装置について述べた。この装置は 4 つのセンサと 1 本の光源を用いて、面内運動および高さ変化の 4 自由度の運動を計測する。高さのみを変化させる実験では、Z 軸の正方向では小さめに、負方向では多めに推定される結果となった。位置・姿勢を同時に変化させる実験の結果、移動量 566 mm に対する位置誤差は 1.1 %、回転量 90 deg に対する角度誤差は 0.64 %であった。今後は計測の自由度を高めて、傾きの運動計

測もできるかどうか検討したい。また、装置を研究用ローバーに取り付けて評価したい。高さ変化するかわり車体の浮き沈みの検出は、車輪のスリップを抑えて最適な駆動力を得るために利用できる可能性がある。

## 謝 辞

本研究は科研費 (21360110) の助成を受けたものである。

## 参 考 文 献

- [1] I. Nagai, K. Watanabe, K. Nagatani and K. Yoshida: "Noncontact position estimation device with optical sensor and laser sources for mobile robots traversing slippery terrains," Proc. of the 2010 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS 2010), pp.3422-3427, 2010.
- [2] J. A. Cooney, W. L. Xu, and G. Bright: "Visual dead-reckoning for motion control of a mecanum-wheeled mobile robot," Mechatronics, vol. 14, iss. 6, pp. 623-637, 2004.
- [3] 関森大介, 宮崎文夫: "複数の光学マウスセンサ値とシンプルな俯瞰カメラ情報を用いた屋内移動ロボットの自己位置推定", 日本機械学会論文集 (C) vol. 71, no.712, pp.144-151, 2005.
- [4] I. Yamaguchi: "Theory and applications of speckle displacement and decorrelation," Speckle Metrology, edited by R.S. Sirohi, Marcel Dekker Inc., pp.1-39, 1993.